

# 高密度に周波数多重化された光子対の生成実験

## Experiment of Frequency-multiplexed Photon Pair Generation

H29助自5

代表研究者 生田 力三 大阪大学 大学院基礎工学研究科 助教  
Rikizo Ikuta Assistant Professor, Graduate School of Engineering Science, Osaka University

Photon pair generation by spontaneous parametric down conversion (SPDC) is widely used for photonic quantum information processing. Typically, in order to suppress multiple photon pair emissions for a high quality of the quantum state, a single photon emission probability is set much smaller than 1, which means no photon emission probability is large. Frequency multiplexed photon pair generation is one of the ways for solving this inefficiency. For achieving the frequency multiplexed photon pairs, we designed a second-order nonlinear optical crystal with high reflective coatings at both ends of the crystal. As a preliminary experiment, we demonstrated frequency comb generation by employing this monolithic device.

The theory of the comb generation is as follows: when a strong pump light with a frequency resonant on the cavity is input to the nonlinear optical medium, second harmonic generation of the fundamental light is generated. Then, optical parametric oscillation of the second harmonic light produces a signal and an idler light around the fundamental pump light. Through cascaded processes of these nonlinear optical interaction, the sideband peaks gradually grow. Finally, the frequency comb spectra with a comb separation corresponding to the free spectral range of the cavity appear.

In our experiment, we used 280-mW pump light at 1540 nm. When we adjusted the pump frequency to on resonant condition, we observed a wide spectral spanning up to 60 nm with a narrow rf beat note spectrum at 3.5 GHz corresponding to the free spectral range. As a future work, by using a pump light with a power much smaller than the threshold value for oscillation, we will demonstrate a frequency multiplexed photon pair generation.

### 研究目的

次世代情報処理である量子情報処理に関する関心が国内外で高まっている。量子情報を扱う物理系は様々あるが、その中で光は通信に使える唯一の媒体であるという特別な役割を担っており、従来の通信では不可能であった量子暗号や量子テレポーテーションなどの様々な技術を可能にする。こうした量子通信において量子情報の担い手は多くの場合、単一光子である。光

子あるいは光子対は、通常自発パラメトリック下方変換 (SPDC) と呼ばれる過程によって生成される。SPDCにおいて用いられる励起光パワーが強いと光子対の多励起現象が生じて量子情報処理の質の低下を引き起こすため、通常は弱励起のもとでSPDCを行う。しかし、弱励起は真空の割合を増加させてしまうため、1光子対生成レートは励起光の繰り返し周波数に対して2桁ないし3桁低くなるという問題がある。この問題を解決するために、周波数多重化に関する研究

が盛んに行われている。本研究では、2次の非線形光学結晶の両端に鏡面加工および誘電体多層膜コートによる高反射率加工をすることで共振器構造を有するモノリシック光子対源を作成し、これを用いて周波数多重化光子対生成を実証することを目的とする。

## 概 要

多くの量子通信プロトコルで広く利用されるエンタングル光子対は、通常、自発パラメトリック下方変換 (SPDC) を用いて生成される。SPDCでは、非線形光学結晶に励起光を入力することでエネルギー保存則を満たす光子対が生成される。SPDCによる光子対生成では理想的な1対の2光子のみが励起される訳ではなく2対3対といった多光子対が同時に励起される。多光子対は単一光子ベースの量子情報処理において質の低下を引き起こす。そこでこの影響を抑制するために弱励起のもとでSPDCを行うのが一般的である。しかし弱励起は真空の割合を増加させてしまうため、1光子対生成レートは、励起光の繰り返し周波数に対して2桁ないし3桁低くなるのが通常である。例えば、励起光の繰り返し周波数がGHzであっても、光子対生成はMHz程度にまで下がってしまう。光子対生成レート向上の手法の1つとして注目されているのが光周波数多重化である。周波数多重化にはいくつかの方法が存在する。素朴に思いつくアイデアとして、周波数的に広がった光子対をあらかじめ生成し、その後バンドパスフィルターで光子対を周波数的に分離する方法がある。しかしこの方法では、高密度周波数多重のために狭線幅フィルターを使う際に透過率を高く維持するのが難しい。これとは違う方法として、共振器構造をあらかじめ光子対源に付与することで元々周波数的に分離された光子対を出す方法がある。この方法では後段の狭線幅フィルターが不要になる

ため、前者に比べて光子対に対する透過率を総合的に高くすることが可能となる。本研究では、こうした背景のもと、2次の非線形光学結晶を光共振器に閉じ込めた光子対生成源を構築し、周波数多重化に向けた実験を行った。

実験で用いた2次の非線形光学結晶は、結晶長20mmの周期分極反転構造を有するニオブ酸リチウム導波路 (PPLN) である。1560nmの2倍高調波発生が温度50°Cで最も効率が高くなるように位相整合の設計がされている。共振器については、より安定で閉じ込め効果の高いデバイスにするべく、導波路端面に誘電体多層膜コートを施すことでモノリシック共振器構造とした。両端の反射率は、1535nmから1770nmの波長の光に対して99%以上であり、745nmから790nmの波長の光に対しては無反射コートとして1%以下になるように設計した。実際に得られた通信波長帯の光に対する共振器の性能は、Q値が $5.5 \times 10^6$ 、半値全値が35MHz、自由スペクトル領域 (FSR) が3.5GHzであった。FSRは導波路長20mmから計算される値とよく一致した値であり、Q値も十分高いものが得られた。光子対生成実験の準備段階として、このモノリシックデバイスに発振閾値以上の励起光を入力することで実際に周波数多重・分離されたコム状のスペクトルが観測されるかを古典光学の範囲で確かめる実験を行った。

励起光として280mWの通信波長の光をPPLNに入力したところ、2倍波生成過程と光パラメトリック発振のカスケード過程によって約60nm程度に広がった周波数コムスペクトルを得ることができた。また、通信波長光の周波数を共振器の共振周波数に合わせて出力光のビート測定を行ったところ、中心周波数3.5GHzの位置に、非常に鋭いビートスペクトルを観測した。このことから、コム間隔はFSRと非常によく一致していることが分かった。今後

の展望として、本デバイスを発振閾値よりも十分小さい励起光で用いることで、周波数多重化された光子対生成器として利用できる可能性が示唆された。また、量子波長変換による周波数自由度量子操作技術と組み合わせることで周波数自由度量子情報処理への応用も期待できる。

－以下割愛－